

병렬프로세서를 이용한 원전 격납건물의 항공기 충돌해석

Numerical Analysis of Nuclear-Power Plant Subjected to an Aircraft Impact using Parallel Processor

송 유 섭*
Song, Yooseob

신 상 섭**
Shin, Sang-Shup

정 동 호***
Jung, Dongho

박 대 효†
Park, Taehyo

요 지

본 논문에서는 항공기 충돌에 의한 원전 격납건물의 거동을 병렬해석을 통해 수행하였다. 지금까지의 원전 격납건물에 대한 항공기 충돌관련 연구는 항공기의 경우, Riera의 충격하중-시간함수를 이상화하여 대상 구조체의 일정영역에 대해 충격하중으로 적용하는 방법을 사용해 왔고 충돌대상 구조체의 경우, 단순 철근콘크리트 벽체나 빌딩에 머물러 왔다. 하지만 본 논문에서는 항공기(Boeing-767, <http://www.boeing.com>)와 가상의 원전 격납건물을 실제와 유사하게 모델링하여 해석을 수행하였으며, 항공기모델은 충돌평가 가이드인 NEI 07-13(2009)에서 허용하는 Riera의 식에 따른 충돌하중이력곡선과 비교하는 방법으로 검증되었다. 또한, 일반적으로 고속 충돌해석은 짧은 시간동안 두 개 이상의 물체가 접촉하고 동적 대변형을 일으키는 비선형성이 강한 문제로 많은 계산시간이 요구되기 때문에 이를 효과적으로 다루기 위해서는 단일 CPU 만으로는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 해석의 효율성을 향상시키기 위해 자체 구축한 리눅스 클러스터 시스템을 이용하여 Message-Passing MIMD 형태의 병렬해석을 수행하였고 병렬성능에 대한 평가를 위해 무근콘크리트(Plain Concrete, PC), 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC), 내부 Liner Plate를 부착한 철근콘크리트(RC with Containment Liner Plate, CLP), SC구조(Steel-Plate Concrete, SC)등 4가지 경우에 대한 수치해석 효율성이 비교·검토되었다.

핵심용어 : 충돌해석, 항공기충돌, 원전 격납건물, 병렬해석, 리눅스 클러스터

Abstract

In this paper, the behavior of nuclear-power plant subjected to an aircraft impact is performed using the parallel analysis. In the erstwhile study of an aircraft impact to the nuclear-power plant, it has been used that the impact load is applied at the local area by using the impact load-time history function of Riera, and the target structures have been restricted to the simple RC(Reinforced Concrete) walls or RC buildings. However, in this paper, the analysis of an aircraft impact is performed by using a real aircraft model similar to the Boeing 767 and a fictitious nuclear-power plant similar to the real structure, and an aircraft model is verified by comparing the generated history of the aircraft crash against the rigid target with another history by using the Riera's function which is allowable in the impact evaluation guide, NEI07-13(2009). Also, in general, it is required too much time for the hypervelocity impact analysis due to the contact problems between two or more adjacent physical bodies and the high nonlinearity causing dynamic large deformation, so there is a limitation with a single CPU alone to deal with these problems effectively. Therefore, in this paper, Message-Passing MIMD type of parallel analysis is performed by using self-constructed Linux-Cluster system to improve the computational efficiency, and in order to evaluate the parallel performance, the four cases of analysis, i.e. plain concrete, reinforced concrete, reinforced concrete with bonded containment liner plate, steel-plate concrete structure, are performed and discussed.

Keywords : *impact analysis, aircraft impact, nuclear-power plant, parallel analysis, linux cluster*

1. 서 론

현재 국·내외에서 소비되는 에너지 수요는 폭발적으로 증가하고 있지만 국내 전체 에너지 소비의 80%가량을 담당하

† 책임저자, 중신회원·한양대학교 건설환경공학과 교수
Tel: 02-2220-0321 ; Fax: 02-2220-4572

E-mail: cepark@hanyang.ac.kr

* 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

** 한양대학교 건설환경공학과 석사과정

*** 한국해양연구원 대전분원 선임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 2월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

고 있는 석탄과 석유 등 화석연료자원은 점차 고갈되고 있다. 따라서 미래의 에너지부족 문제해결을 위해선 높은 화석연료 에너지 의존도를 낮추고 이를 대체할 수 있는 에너지원의 확보가 필수적이며 현재까지는 풍력, 태양광 발전보다 온실가스 배출량이 적어 친환경적이면서 경제적 효율성은 더 좋은 원자력이 가장 효율적인 에너지원으로 꼽히고 있다. 이에 따라 현재 전 세계적으로 원자력 발전소 건설이 급증하고 있으며 향후 482기의 원자력 발전소가 건설될 예정 및 검토 중에 있다(2011.3월 세계원자력협회). 하지만 원자력 발전소 격납건물(원전 격납건물)의 특성상 단 한번의 사고로 인간과 주변지역 생태계에 막대한 피해를 입힐 것으로 예상되어 일반구조물 설계 시보다 엄격한 안전성이 요구된다. 원전 격납건물 설계 시 고려하는 설계기준사고는 크게 자연재해와 외부사고로 구분할 수 있으며 자연재해에는 지진, 지진해일, 태풍 등이 있고 외부사고에는 충돌, 폭발, 화재 등이 포함된다. 본 연구에서는 그 중 격납건물 외부에 발생하는 항공기 충돌에 관한 해석을 수행하였다.

원전 격납건물에 대한 충돌관련 연구는 2001년 WTC와 미국방성에 대한 항공기테러 발생 후, 주요사회기반시설에 대한 미사일 공격과 항공기 충돌에 대한 중요성이 부각되었으며 (Arros 등, 2007), 특히 공격 대상으로 지정되었을 시 막대한 피해가 예상되는 원전 격납건물에 대한 관심이 커져왔다. 지금까지의 원전 격납건물에 대한 항공기 충돌관련 연구는 격납건물의 국부적인 부분에 대해 항공기 모델에 따라 Riera의 충격하중-시간함수를 이상화하여 적용(Abbas 등, 1996)하거나 철근 콘크리트 벽체의 두께에 따른 충돌 해석(Katayama 등, 2004) 정도에 국한되어 왔지만 신상섭 등(2011)은 실제 크기와 유사한 항공기를 Riera의 가정 사항에 따라 모델링하여, 항공기 충돌평가 가이드인 NEI 07-13 (2009)에서 허용하는 Riera의 식에 따라 충돌하중이력을 산정한 후 해석결과를 비교하는 방법으로 항공기모델을 검증한 바 있다.

또한, 일반적으로 이러한 고속 충돌해석은 짧은 시간에 두 개 이상의 물체가 접촉하고 동적 대변형을 일으키는 비선형성이 매우 강한 문제이고 대변형과 재료의 비선형 거동을 고려한 강도행렬(Stiffness Matrix)의 계산 및 조합, 요소의 변형을 및 응력 계산과정 등은 반복적으로 수행되므로 단일 CPU를 사용하여 해석할 경우 상당히 많은 해석시간이 요구된다. 이에 본 연구에서는 수치해석의 효율성을 향상시키기 위해 앞서 서술한 방법으로 검증된 항공기 충돌에 의한 원전 격납건물 해석을 Message-Passing MIMD 형태의 병렬해석을 통해 수행하였다. 특히 앞서 서술한 반복계산은 상당부분이 요소단위 내에서 이루어지기 때문에 병렬해석을 수행하기에 적합하며 특히 반복계산과정에서 소요되는 시간은 전체 해석소요시간의

대부분을 차지하므로 병렬처리기법에 의한 높은 효율성을 기대할 수 있다. 과거 충돌 및 폭발해석에 병렬해석을 적용한 경우는 문지중 등(2009)이 세라믹 재료의 고속충돌 파괴현상에 대한 병렬 해석기법을 다루었으며 박재원 등(2011)은 폭발하중을 받는 철근콘크리트 패널의 손상을 병렬과 영역분할을 이용하여 분석한 바 있다. 본 연구에서는 이러한 병렬성능에 대한 평가를 위해 무근콘크리트(PC), 철근콘크리트(RC), 내부 Liner Plate를 부착한 철근콘크리트(CLP), SC구조(SC) 등 4가지 경우에 대한 수치해석 효율성을 비교·검토하였다.

2. 충돌해석

2.1 Hydrocode

Hydrocode는 Hydrodynamics Code의 줄임말로써 Hypervelocity Impact에 의해 미소시간 내에 발생하는 대상 구조체 재료의 대변형, 대회전, 대변형률, 상태변화등의 비선형 거동 문제를 유한차분법(Finite Difference Method), 유한체적법(Finite Volume Method), 그리고 유한요소법(Finite Elements Method)을 사용하여 해석하는 코드이다.

그림 1은 Hydrocode의 일반적인 해석과정을 나타낸 것으로 각각의 시간단계마다 mesh에 작용하는 힘을 결정하기 위해서는 다음과 같은 3개의 식, 즉, 뉴턴의 운동법칙(Newtonian Laws of Motion), 상태방정식(Equation of State), 구성방정식(Constitutive Equation)이 사용된다. 일반적으로 고체 역학분야에서는 구성방정식의 설정이 용이하고 복잡한 경계면에서 정확한 경계조건을 부과할 수 있는 Lagrangian Description이 강력한 장점을 가지는데 항공기 충돌에 의한 격납 건물의 응답평가를 수행하는 본 연구에서도 Lagrangian Description을 적용하였다.

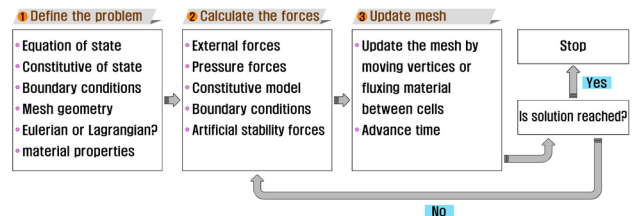


그림 1 Flow chart summarizing the general scheme of a hydrocode(Collins, 2002)

2.2 지배방정식

2.2.1 질량 보존방정식

Lagrangian processor에서 하나의 격자가 지니고 있는

초기 질량은 찌그러짐과 같은 체적의 변형에도 일정하므로 임의의 시간에서 밀도는 다음 식으로 구해진다.

$$\rho = \frac{\rho_o V_o}{V} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

여기서, ρ_o 는 초기밀도, V_o 는 초기체적을 나타낸다.

2.2.2 운동량 보존방정식

본 연구에서 적용된 운동량 보존방정식은 식 (2)와 같이 가속도와 응력의 관계로 표현되며 식 (2)에서 나타낸 응력은 정수압력 P , 인공점성 q 및 편차응력 s_{ij} 을 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho \ddot{x} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} & (2) \\ \rho \ddot{y} &= \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \ddot{z} &= \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \\ \sigma_{xx} &= -(p+q) + s_{xx} & (3) \\ \sigma_{yy} &= -(p+q) + s_{yy} \\ \sigma_{zz} &= -(p+q) + s_{zz} \\ \sigma_{xy} &= s_{xy}, \sigma_{yz} = s_{yz}, \sigma_{zx} = s_{zx} \end{aligned}$$

또한, 탄성체에 대하여 편차응력 변화율(\dot{s}_{ij})과 변형률속도($\dot{\epsilon}_{ij}$)의 관계는 Hooke's Law를 적용하면 식 (4)와 같이 전단탄성계수(G)와 체적변화율(\dot{V}/V)의 항으로 표현되고 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 와 \dot{V}/V 은 각각 식 (5), 식 (6)을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s}_{xx} &= 2G \left(\dot{\epsilon}_{xx} - \frac{\dot{V}}{3V} \right) & (4) \\ \dot{s}_{yy} &= 2G \left(\dot{\epsilon}_{yy} - \frac{\dot{V}}{3V} \right) \\ \dot{s}_{zz} &= 2G \left(\dot{\epsilon}_{zz} - \frac{\dot{V}}{3V} \right) \\ \dot{s}_{xy} &= 2G \dot{\epsilon}_{xy}, \dot{s}_{yz} = 2G \dot{\epsilon}_{yz}, \dot{s}_{zx} = 2G \dot{\epsilon}_{zx} \\ \dot{\epsilon}_{xx} &= \frac{\partial v_x}{\partial x}, \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y}, \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z} & (5) \\ \dot{\epsilon}_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ \dot{\epsilon}_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \dot{\epsilon}_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\dot{V}}{V} = \dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy} + \dot{\epsilon}_{zz} \quad (6)$$

여기서, v_x, v_y, v_z 는 각각 x, y, z 방향 속도이다.

2.2.3 에너지 보존방정식

Lagrangian processor에 적용되는 에너지 보존방정식은 다음과 같이 표현되며 여기서, e 는 내부에너지이다.

$$\rho \dot{e} = \sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx} \quad (7)$$

2.2.4 상태방정식(Equation of State, EOS)

상태방정식은 적용범위에 따라 다양한 형태의 식들이 알려져 있으며, 일반적으로는 압력(P)과 밀도(ρ) 및 내부에너지(e)의 관계식으로 표현된다. 본 연구에서 격납건물에 사용된 RHT콘크리트는 충돌, 폭발 등에 주로 사용되는 P -alpha 상태방정식이 적용되었다.

$$P = f(\rho, e) = A_1 \mu + A_2 \mu + A_3 \mu + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e \quad (8)$$

$$P = f(\rho \alpha, e) \text{ with } \alpha = 1 + (\alpha_{init} - 1) \left[\frac{P_0 - P}{P_0 - P_{cr}} \right]^n \quad (9)$$

완전 압축거동을 하는 재료의 상태방정식은 식 (8)과 같이 표현되며, 여기서, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ_0 는 기준 초기밀도, e 는 초기에너지, 변수 A_1, A_2, A_3, B_0, B_1 은 재료의 고유값을 나타낸다. 반면 콘크리트와 같은 다공질 재료는 완전 압축거동을 하는 재료에 대해 식 (9)와 같이 porosity α 를 적용함으로써 스케일조정을 하며, P_{cr} 는 초기 압축압력(공극이 없는 상태의 압력)을, P_0 은 고체 압축 압력(콘크리트의 공극률이 α_{init} 인 경우의 압력)을 나타낸다.

2.3 외연적 시간적분법

최근 컴퓨터의 계산 속도가 비약적으로 발전함에 따라 충돌과 같은 동적문제를 해석하기 위하여 외연적(Explicit) 시간적분법의 적용이 증가되고 있다. 특히, 복잡한 3차원 형상이나 비선형성이 존재하는 동적문제에서 내연적(Implicit) 시간적분법은 강성 및 질량행렬에 대한 복잡한 계산이 필요하고 각각의 시간단계에서 강성행렬의 역을 구해야 하기 때문에 비효율적이며 수렴성의 문제가 발생한다. 반면 외연적 시간적분법은 구조계 전체의 강성행렬이 필요하지 않고 일반적인 비선형의 정확한 처리와 용이한 실행을 장점으로 가진다. 수치해석을 위

한 운동방정식은 일평형(work balance)으로부터 유도되며 다음과 같이 표현된다.

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + R^i = R^e \tag{10}$$

여기서, M 와 C 는 각각 질량행렬과 점성행렬을 나타내며, 질량행렬은 외연적 시간 적분법의 장점을 살리고 CPU 연산 처리 속도 향상을 위해 대각행렬(diagonal matrix)로 만들어준다. \ddot{d} 와 \dot{d} 는 가속도벡터와 속도벡터이며, R^i 와 R^e 는 각각 외력벡터와 내력벡터를 나타낸다. 외연적 시간적분법에서 시간적분은 중앙차분(Central Difference)방식이 적용되며, 계산의 편의를 위해 식 (10)에서 점성행렬 C 를 무시하면 각 노드에서의 시간적분은 식 (11)~(13)과 같이 수행된다.

$$\ddot{d}^{(t_n)} = M^{-1}(R^e(t_n) - R^i(t_n)) \tag{11}$$

$$\dot{d}^{(t_{n+1/2})} = \dot{d}^{(t_n)} + (t_{n+1/2} - t_n)\ddot{d}^{(t_n)} \tag{12}$$

$$d^{(t_{n+1})} = d^{(t_n)} + (t_{n+1} - t_n)\dot{d}^{(t_{n+1/2})} \tag{13}$$

3. 유한요소 모델링

3.1 항공기 모델 및 Riera 충돌하중이력곡선

3.1.1 항공기 모델

본 논문의 충돌해석에 사용된 항공기는 Boeing 767(EPRI, 2002)을 선택하였으며 항공기 모델의 재료는 Katayama (2004)가 사용한 재료인 AL2024-T351을 적용하였고, 재료에 대한 물성치는 표 1에 나타내었다. 또한, 항공기는 Shell 요

표 1 Material Properties of AL2024-T351

Strength Model	Johnson Cook Model
Shear Modulus	2.76E+04(MPa)
Yield Stress	3.24E+02(MPa)
Failure	Plastic Strain

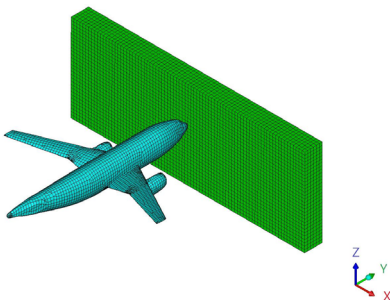


그림 2 Rigid Target against a Large Aircraft Impact

소로 모델링하였으며 항공기에 대한 파괴기준은 NEI 07-13 (2009)을 따라 Plastic Strain 0.1을 적용하였다.

그림 2에 나타난 Boeing-767 항공기 모델은 이륙시 최대 항공유류 용량을 고려하였으며, 항공기의 질량이 각 절점에 분포되도록 모델링하였다. 또한 항공기의 속도는 미국 EPRI의 보고서(2002)에서 가정한 150m/sec를 적용하였으며, 이는 WTC 테러시 발생한 항공기 충돌속도와 유사하다.

3.1.2 Riera Forcing Function

본 연구에서 사용한 Riera(1968; 1980)식의 기본 가정은 다음과 같다. 충돌대상 구조물은 강성 벽(Rigid Target)이고, 항공기의 축과 길이 방향은 구조물에 직각이며, 항공기는 속도(v)를 갖는 원형 그대로 비행하는 부분과 속도가 0인 찌그러지는 부분으로 나뉜다. 그리고 항공기의 모든 찌그러짐은 강성 벽과 인접한 부위에서 국부적으로 발생하며, 항공기는 완전 강소성 거동을 하는 것으로 가정한다. 항공기 충돌로 인하여 강성 벽에 발생하는 충격함수-시간이력 $F(t)$ 는 식 (14)의 미분방정식(NEI 07-13, 2009)을 이용하여 구한다.

$$F(t) = P_c[x(t)] + \alpha_\gamma \mu[x(t)](dx/dt)^2 \tag{14}$$

여기서, $x(t)$ 는 항공기의 충돌길이, $P_c[x(t)]$ 는 위치 x 에서 엔진을 제외한 기체가 축방향으로 충돌한 정적하중, α_γ 는 실험에 의한 계수, dx/dt 는 충돌하지 않은 부분의 속도를 나타내며, $\mu[x(t)]$ 는 위치 x 에서의 단위길이당 질량으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mu[x(t)] = \mu_s[x(t)] + \mu_e[x(t)] + \mu_f[x(t)] \tag{15}$$

여기서, $\mu_s[x(t)]$, $\mu_e[x(t)]$, $\mu_f[x(t)]$ 는 각각 엔진을 제외한 기체, 항공기의 장비부분, 연료의 단위길이당 질량이다. Riera식의 검증은 F-4D의 충돌시험을 통하여 입증된 바 있으며, 저감계수(α_γ) 0.9의 값을 적용하는 개정된 식이 현재 이용되고 있다.

3.1.3 충돌하중이력곡선

본 논문에서는 항공기 모델의 적정성을 판단하기 위하여 현재 항공기 충돌해석에서 인정되고 있는 Riera식에 따라 구한 이론적 충돌하중이력곡선과, 그림 2와 같이 항공기를 강성벽에 충돌시켜 구한 충돌하중이력곡선을 비교하였으며 그 결과, 그림 3에 나타난 것과 같이 해석결과와 Riera식의 최대값이 약 250MN으로 동일하고, 전반적인 충돌에너지는 유사하게 나타나므로 본 연구에서 사용되는 항공기 모델은 적

정하다고 판단된다.

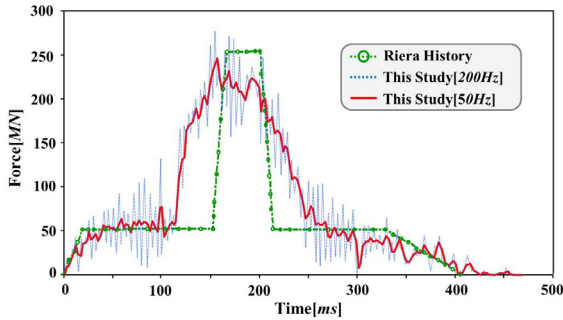


그림 3 Reaction History

3.2 격납건물 모델

그림 4는 해석에 사용된 RC격납구조의 제원 및 철근 배근을 나타낸 것으로 격납건물의 크기는 표 2에 나타난 실제 원전 격납건물과 2%이내의 오차를 지닌다. 콘크리트와 보강 철근은 각각 Solid 요소와 Truss 요소로 모델링하였으며, RC구조에 완전 부착된 내부 Liner Plate와 SC구조의 내·외부 Liner Plate는 각각 6.35mm, 19.04mm의 두께를 가지는 Shell 요소로 모델링하였다.

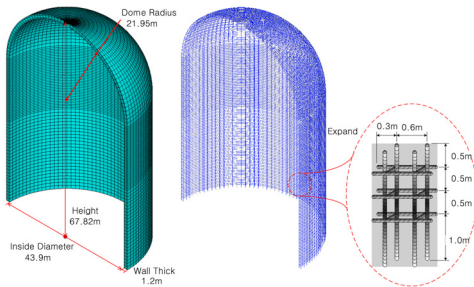


그림 4 Specification of Containment Building, Finite Element Model of Steel and Concrete

표 2 Specification of Real and Fictitious Structure

Dimension	Real Structure	Fictitious Structure
Height(m)	67.82	67.00
Inside Diameter(m)	43.90	44.00
Wall Thickness(m)	1.15	1.20
Dome Radius(m)	21.95	22.00

3.3 재료 모델

재료의 동적거동 문제를 풀기 위해서는 앞서 기술한 지배방정식 외에도 적절한 초기·경계조건이 필요하며, Hydrocode에서는 또한 상태·강도·손상방정식이 요구된다.

3.3.1 Concrete

본 연구에서 사용된 콘크리트의 강도모델은 RHT모델 (FOI, 2002)이며, RHT콘크리트의 손상(D) 방정식은 소성 변형률($\Delta \epsilon_p$)과 파괴변형률($\epsilon_p^{failure}$)에 관한 식으로 다음과 같이 나타내어진다.

$$D = \Sigma \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^{failure}}$$

with $\epsilon_p^{failure} = D_1 (P^* - P_{spall}^*)^{D_2}$ (16)

여기서, D_1 , D_2 는 재료상수, P^* 와 P_{spall}^* 은 각각 f_c 로 나눈 압력과 파편의 강도를 나타내며 콘크리트에 대한 재료 물성치와 상수는 표 3에 나타내었다.

표 3 Material Properties of Concrete

Parameter	Value
Equation of State	P alpha
Parameter, B_1	1.220e+00(none)
Parameter, T_1	3.527e+07(kPa)
Parameter, T_2	0.000e+00(kPa)
Bulk Modulus, A_1	3.527e+07(kPa)
Strength	RHT Concrete
Shear Modulus	1.670e+07(kPa)
Compressive Strength, f_c	3.50e+04(kPa)
Tensile Strength, f_t/f_c	1.0e-01(none)
Shear Strength, f_s/f_c	1.80e-01(none)
Intact Failure Surface Constant, A	1.60e+00(none)
Intact Failure Surface Exponent, N	6.10e-01(none)
Failure	RHT Concrete
Damage Constant, D_1	4.00e-02(none)
Damage Constant, D_2	1.00e+00(none)
Residual Shear Modulus Fraction	1.30e-01(none)
Tensile Failure	Hydro(P_{min})
Erosion	Geometric strain

3.3.2 Steel(철근 및 Liner Plate)

보강철근과 내·외부 Liner Plate에 사용되는 강재(Steel)는 Linear 상태방정식이 적용되며, Hooke's Law에 따라 압력과 체적변화의 관계는 다음과 같이 제시된다.

$$P = K\mu \quad (17)$$

여기서, K 는 재료의 체적 탄성계수를 나타낸다. 또한 강재에 대한 강도모델은 Johnson-Cook모델(1983)이 사용되었으며 항복응력은 다음과 같이 표현된다.

$$Y = [A + B\epsilon_p^n][1 + C \log \epsilon_p^*][1 - T_H^m]$$

$$\text{with } T_H = \frac{(T - T_{room})}{(T_{room} - T_{melt})} \quad (18)$$

여기서, ϵ_p 는 등가소성변형률, ϵ_p^* 는 등가소성변형률 속도를 나타내며 A, B, C, n, m 은 각각 절대소성변형률, 변형률 경화지수, 변형률속도상수, 변형률경화지수, 열연화지수를 나타내는 상수이다. 또한 T_H 는 균일온도, T_{room} 과 T_{melt} 는 각각 실온과 용점온도를 나타내며 강재에 대한 재료 물성치는 표 4에 나타내었다.

표 4 Material Properties of Steel

Parameter	Value
Equation of State	Linear
Reference density	7.83e+00(g/cm ³)
Bulk Modulus	1.59e+08(kPa)
Strength	Johnson Cook
Shear Modulus	8.18e+07(kPa)
Yield Stress(Reinforced Bar)	5.121e+05(kPa)
Yield Stress(Liner Plate)	2.846e+05(kPa)

4. 병렬해석

고속 충돌해석은 짧은 시간에 두 개 이상의 물체가 접촉하고 동적 대변형을 일으키는 비선형성이 매우 강한 문제이며 이러한 대변형과 재료의 비선형 거동을 고려한 강도행렬 (Stiffness Matrix)의 계산 및 조합, 요소의 변형률 및 응력 계산과정 등이 반복적으로 수행되기 때문에 많은 계산시간이 요구되어 이를 효과적으로 다루기 위해서는 단일 CPU 만으로는 한계가 있어 분산된 CPU와 Memory같은 컴퓨터 자원을 동시에 사용하는 병렬해석이 필요하다.

병렬컴퓨터 시스템은 이러한 분산된 여러 개의 CPU와 컴퓨터 자원을 동시에 사용하기 때문에 단일 CPU보다 성능이 향상되는 것은 당연하지만 여러 가지 요인들로 인해 성능향상이 CPU의 개수에 비례하여 증가하지 않는다. 병렬해석의 성능에 대한 평가는 일반적으로 Speed-up(S_p)과 Parallel Efficiency (E_p)를 가장 많이 사용하는데 Speed-up이란 단일 CPU를 사용하는 일반 알고리즘 해석에 소요되는 시간과 n 개의 CPU를 사용하는 병렬알고리즘 해석에 소요되는 시간을 비교한 값으로 식 (19)과 같이 정의되고 Parallel Efficiency는 문제를 해석함에 있어 통신과 동기화 과정에 낭비되는 시간들을 고려함으로써 병렬알고리즘이 얼마나 효율적인 가를 나타내는 것으로 식 (20)과 같이 정의된다.

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} \quad (19)$$

$$E_p = \frac{S_p}{n} = \frac{T_1}{n \cdot T_p} \quad (20)$$

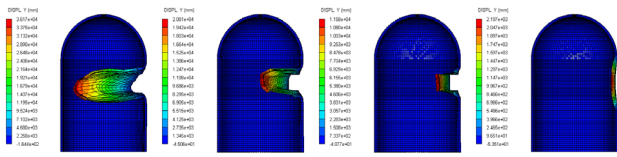
여기서, p 는 CPU의 수, T_1 은 단일 CPU를 사용할 때의 해석소요시간(Running Time), T_p 는 n 개의 CPU를 사용할 때의 해석소요시간을 나타낸다. 따라서 가장 이상적인 경우는 n 개의 CPU를 사용하여 n 만큼의 Speed-up을 얻는 경우이며, 이때 Parallel Efficiency는 1.00이 되고 이 경우는 linear Speed-up이라 정의한다.

과거와는 달리 컴퓨터의 성능 대비 가격이 점차 저렴해 짐에 따라 대학 및 연구실 단위에서 병렬컴퓨터 시스템을 자체적으로 구축하는 경우가 많아지고 있는데, 그 중 가장 대표적인 경우가 리눅스 클러스터 시스템이다. 본 연구에서도 총 53노드의 Neahlem CPU(2.4GHz, 8Core)와 QDR급 전송속도의 네트워크장비로 자체 구축된 리눅스 클러스터 시스템을 사용하여 병렬해석을 수행하였으며 성능평가를 위해 무근콘크리트 (Plain Concrete, PC), 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC), 내부 Liner Plate를 부착한 철근콘크리트(RC with Containment Liner Plate, CLP), SC구조(Steel Plate Concrete, SC)등 4가지 경우에 대한 수치해석 효율성이 비교·검토되었다.

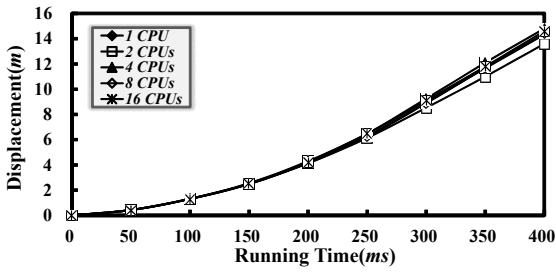
5. 해석결과

그림 5는 격납구조의 변형 형상을 나타낸 것으로, 충돌 시 발생하는 격납건물의 변위는 철근, Liner Plate의 유무와 SC구조의 적용 유무에 따라 달라진다. 그림 5의 (a), (b)에서 나타난 비정상적인 변위는 충돌이 발생한 후 항공기의 기수가 격납구조의 벽체를 관통하여 콘크리트와 철근 등 재료의 기하학적 변형률을 넘어서 완전히 파손되었으나, 요소가 계속적으로 이동하는 것으로 보이는 해석상의 착시현상이다. 또한 그림에서 볼 수 있듯이 SC구조는 PC, RC, CLP의 변위 대비 각각 25~35%, 35~40%, 50~60%정도의 변위를 가지는 것으로 나타나 상대적으로 높은 안전성을 보였으며 따라서 내·외부 Plate의 찢어짐(Tear)현상을 방지하여 스케빙(Scabbing), 관통(Penetration), 관입(Perforation)현상 등을 방지할 수 있을 것으로 보인다.

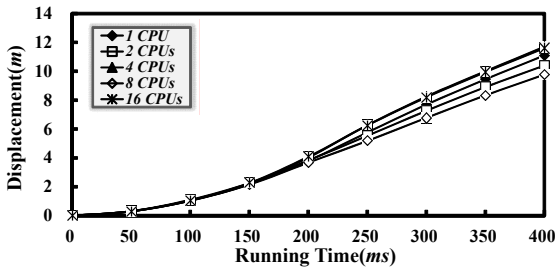
그림 6은 4가지 경우(PC, RC, RC+CLP, SC)에 대해 병렬해석에 사용된 CPU의 개수에 따른 항공기 동체 충돌 위치에서의 변위를 나타낸 변위-시간 이력곡선이다. 4가지 경우 모두 150~200ms 구간 이후 변위가 급격하게 증가하며 0~200ms 구간에서는 CPU 개수에 따른 해석결과의 차이가 매우 적었으나 150~200ms 구간을 전후해서 (b),



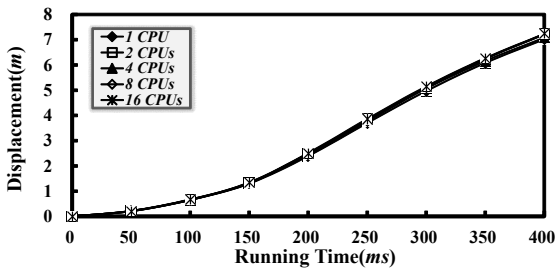
(a) PC (b) RC (c) RC+CLP (d) SC
그림 5 Deformation Shape



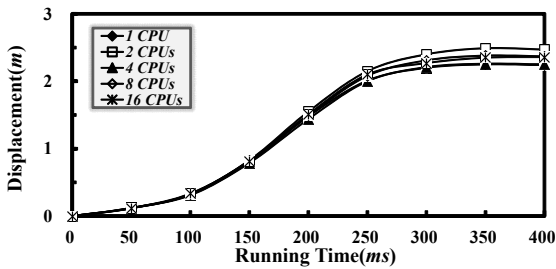
(a) PC



(b) RC



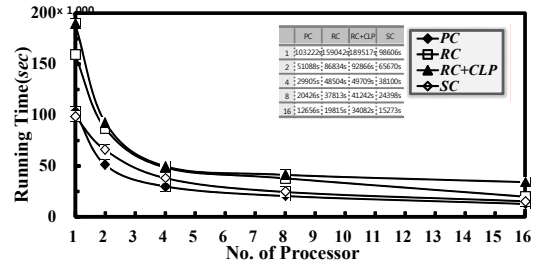
(c) RC+CLP



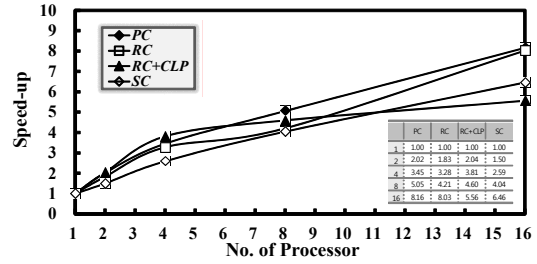
(d) SC

그림 6 Displacement-Time History

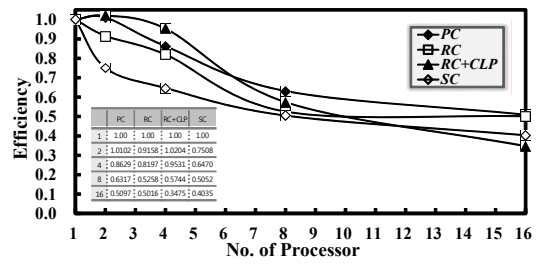
(d)에서 나타나듯이 시간이 지날수록 결과값의 차이가 커지는 경향을 보였다. 이는 그림 3의 충돌-하중 이력곡선에서 보듯이 항공기의 총 충돌시간이 0~400ms에 분포되어 있으며 그 중 최대 충돌하중이 가해지는 시간대는 150~200ms 이므로 이 시간대 이후 분할된 영역 간 주고받는 data가 급



(a) Running Time



(b) Speed-up



(c) Efficiency

그림 7 Results of Parallel Analysis according to the Number of Processors

격하게 증가함에 따른 것으로 보인다.

그림 7는 4가지 경우에 대해 사용된 CPU의 개수에 따른 병렬해석의 효율성에 대한 결과를 나타낸 것으로 (a), (b), (c)는 각각 총 해석수행시간(Running Time), Speed-up, Efficiency이다. 모든 경우에 대해 단일 CPU를 사용하는 경우보다 여러 개의 CPU를 사용하는 경우에 월등한 속도향상을 보였지만 2개의 CPU를 사용할 시 평균 Speed-up은 1.85이고 4개, 8개, 12개를 사용할 시의 평균 Speed-up은 각각 3.28, 4.47, 7.05로 계산되어 CPU의 개수에 비례하여 Speed-up이 증가하진 않았다. 이는 분할된 영역들 사이의 접촉처리 부분에 대한 계산과정에서 data를 주고받는데 많은 시간이 소요되거나 각각의 CPU에 처리할 data를 할당함에 있어 부하가 불균등하게 걸리는 것이 주된 원인으로 보이며 이를 개선하면 더욱 좋은 병렬 효율을 확보할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 항공기 충돌에 의한 원전 격납건물의 거동

을 병렬해석을 통해 수행하였다. 이를 위해 Hydrocode에 대한 이론과 유한요소 정식화, 외연적 시간 적분법이 소개되었으며, 기존의 항공기 충돌관련 연구에서 보여 왔던 한계점에서 벗어나 실제 크기와 유사한 항공기를 Riera의 가정 사항에 따라 모델링하여 해석을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 수치해석의 효율성을 향상시키기 위해 4가지 경우에 대해 자체 구축된 리눅스 클러스터 시스템을 사용하여 Message Passing MIMD 형태의 병렬해석을 수행하였다. 그 결과, 여러 개의 CPU를 사용하는 경우, 단일 CPU를 사용하는 경우에 비해 CPU의 개수에 따라 많게는 8배까지 해석소요시간이 절감되는 것으로 나타나 해석속도 측면에서는 많은 향상을 보였지만 Efficiency 측면에서는 더욱 개선할 수 있는 여지를 보였다. 즉, n 개의 CPU를 사용하여 n 만큼의 S_p 를 얻은 경우($E_p=1$)를 일컫는 Linear Speed-up 상태에 이르기 위해서 분할된 영역들 간의 data 송수신 효율을 개선하고 부하 불균등 등의 문제를 해결하면 더욱 좋은 병렬 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 사용된 CPU의 개수에 따른 격납건물의 최대변위를 검토한 결과, 항공기의 충돌하중이 최대가 되는 시점에서 격납건물의 변위와 분할된 영역 간 주고받는 data의 양이 급격히 증가함에 따라, 단일 CPU에 의한 일반해석에 따른 결과와 병렬해석에 의한 결과 사이의 오차가 증가하는 양상을 보여 이에 대한 연구가 추후 필요할 것으로 보이며, 또한, 본 연구에선 고려되지 않은 SC 구조의 Tie-Bar에 대한 영향 및 충격고온에 취약한 프리스트레싱의 영향 등에 대한 해석은 콘크리트와 Tie-bar, PS텐던의 복합작용으로 인해 일반 비선형해석에 비해 복잡하고 해석도 상당히 많은 시간이 소요되므로 병렬계산에 의한 효율이 클 것으로 보여 이에 대한 연구도 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발” 사업과 한국연구재단을 통해 교육과학기술부가 지원하는 “세계수준의 연구중심대학 육성사업(WCU) (R32-2008-000-20042-0)”의 성과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

문지중, 김승조, 이민형 (2009) 세라믹/금속판재의 고속충돌 파괴 유한요소 병렬해석 기법, 한국전산구조공학회 논문집, 22(06), pp.527~532.

박재원, 윤성환, 박대호 (2011) 병렬과 영역분할을 이용한 폭발하중을 받는 철근콘크리트패널의 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 24(4), pp.365~373.

신상섭, 박대호 (2011) Hydrocode를 이용한 격납구조의 대형 민항기 충돌해석, 대한토목학회 논문집, 31(5A), pp.369~378.

Abbas, H., Paul, D.K., Godbole, P.N., Nayak, G.C. (1996), Aircraft Crash upon Outer Containment of Nuclear Power Plant, *Nuclear Engineering and Design*, 160, pp.13~50.

ANSYS Inc. (2008) AUTODYN Parallel Processing Tutorial.

Arros, J., Doumbalski, N. (2007) Analysis of Aircraft Impact to Concrete Structures, *Nuclear Engineering and Design*, 237, pp.1241~1249.

Boeing 767 Family <http://www.boeing.com/commercial/767family/>

Century Dynamics (2004) AUTODYN User's Manual.

Collins, G.S. (2002) An Introduction to Hydrocode Modelling, Unpublished Lecture Notes, Arizona, USA: The University of Arizona, Available at: <URL: http://www.lpl.arizona.edu/~gareth/publications/sales_2/download/intro.pdf>

Electric Power Research Institute (EPRI) (2002) Detering Terrorism: Aircraft Crash Impact Analyses Demonstrate Nuclear Power Plant's Structural Strength.

Katayama, M., Itoh, M., Rainsberger, R. (2004) Numerical Simulation of Jumbo Jet Impacting on Thick Concrete Walls-Effects of Reinforcement and Wall Thickness, 2nd Asian Conference on High Pressure Research (ACHPR-2), Nara, Japan.

Nuclear Energy Institute (NEI 07-13) (2009) Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plat Designs.

Riera, J.D. (1968) On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Forces, *Nuclear Engineering and Design*, 8, pp.415~426.

Riera, J.D. (1980) A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant Safety Against Accidental Aircraft Impact, *Nuclear Engineering and Design*, 57, pp.193~206.

- 논문접수일 2011년 11월 1일
- 논문심사일 1차 2011년 11월 8일
2차 2011년 11월 25일
- 게재확정일 2011년 11월 28일